

水素燃焼試験等の概要

- (・ 火炎色等確認試験の概要、
 - ・ 水素燃焼試験の概要、
 - ・ 混合気体燃焼試験の概要、
 - ・ ケーブル等加熱試験（2021年度）結果の概要)

2022年9月6日

東京電力福島第一原子力発電所事故対策室

水素燃焼試験等の概要

3号機の水素爆発時の映像では、火炎及び噴煙の状態から水素以外に可燃性ガスの存在が示唆された。火炎の色や輝度、燃焼時間等から可燃性の有機化合物が相当量存在していたと考えられる。また、爆発直後の衛星写真ではシールドプラグ部分から激しく水蒸気が噴出しており原子炉建屋内部にも相当量の水蒸気が存在したと考えられる。

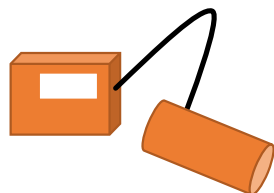
1号機及び3号機の原子炉建屋において発生した水素爆発に関して、deflagration（爆燃）を考慮した水素濃度等の条件による水素燃焼時の挙動及び原子炉格納容器内で発生し、原子炉建屋内に漏えいしたと考えられる可燃性有機ガスによる水素燃焼への影響を把握することを目的に、以下の水素及び可燃性有機ガスの燃焼試験等を実施する。

- 1) 火炎色等確認試験
- 2) 水素燃焼試験
- 3) 混合気体燃焼試験

火炎色等確認試験の概要

火炎色等確認試験の概念

火炎温度測定用
赤外線放射温度計



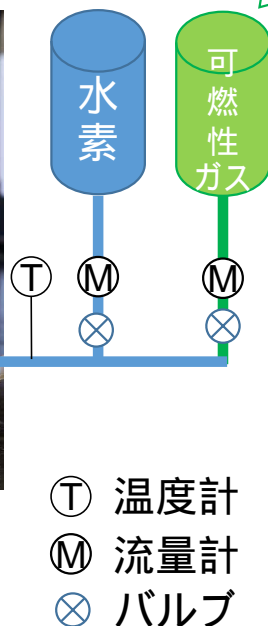
記録用カメラ



ブンゼンバーナー
等

可燃性有機ガス

- ・メタン(CH₄)_低分子量ガス
- ・ブタン(C₄H₁₀)、ペンタン(C₅H₁₂)_高分子量ガス



- Ⓣ 温度計
- Ⓜ 流量計
- ⊗ バルブ

- 水素 + 可燃性有機ガスの混合気体の燃焼時の火炎色を確認。
- 水素濃度(4vol% ~ 20vol%等)、可燃性有機ガス濃度(数vol%等)、酸素濃度(空気量)による燃焼時の火炎の色、煙・煤等の発生状態を確認。
- 記録用カメラ及び赤外線放射温度計等により、火炎の色及び温度分布を記録
- 1号機及び3号機原子炉建屋水素爆発時の火炎及び噴煙の状態と比較検討する。

火炎色等確認試験の試験条件の例

試験資機材

記録用カメラ

赤外線サーモグラフィ

オートバーナー

流量計

水素ガス等(水素ガス、メタンガス、ブタンガス)

パラメータ

A) 水素濃度_4 vol%、8 vol%、10 vol%、20 vol%、30 vol% 【5パラメーター】

B) 可燃性有機ガス種類_メタン(CH₄)、ブタン(C₄H₁₀) 【2パラメーター】

C) 可燃性有機ガス濃度_0 vol%、1 vol%、5 vol% 【3パラメーター】

測定項目

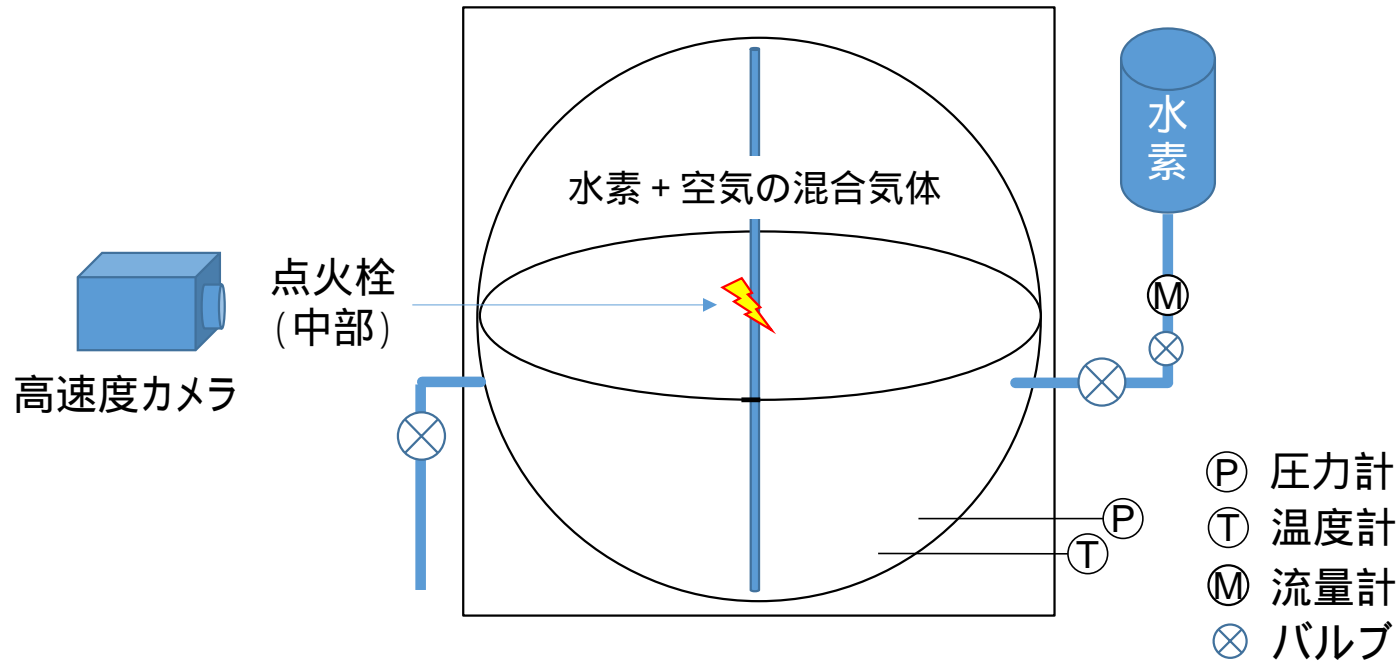
A) 水素ガス及び可燃性有機ガスの流量(濃度)及び温度

B) 記録用カメラによる燃焼挙動(水素等の燃焼時の火炎色及び煙・煤等の発生状態)

C) 赤外線放射温度計等による火炎の温度分布

水素燃焼試験の概要

水素燃焼試験の概念



- 水素 + 空気の混合気体を想定
- 水素濃度 (4vol% ~ 20vol%等) による着火時の燃焼状態 (高速度カメラ) や燃焼による温度、圧力上昇を確認

水素燃焼試験の試験条件の例

試験資機材

水素燃焼装置

高速度カメラ

流量計、温度計、圧力計

水素ガス等(水素ガス、空気)

パラメータ

A) 水素濃度_4 vol%、8 vol%、10 vol%、20 vol% 【4パラメータ】

測定項目

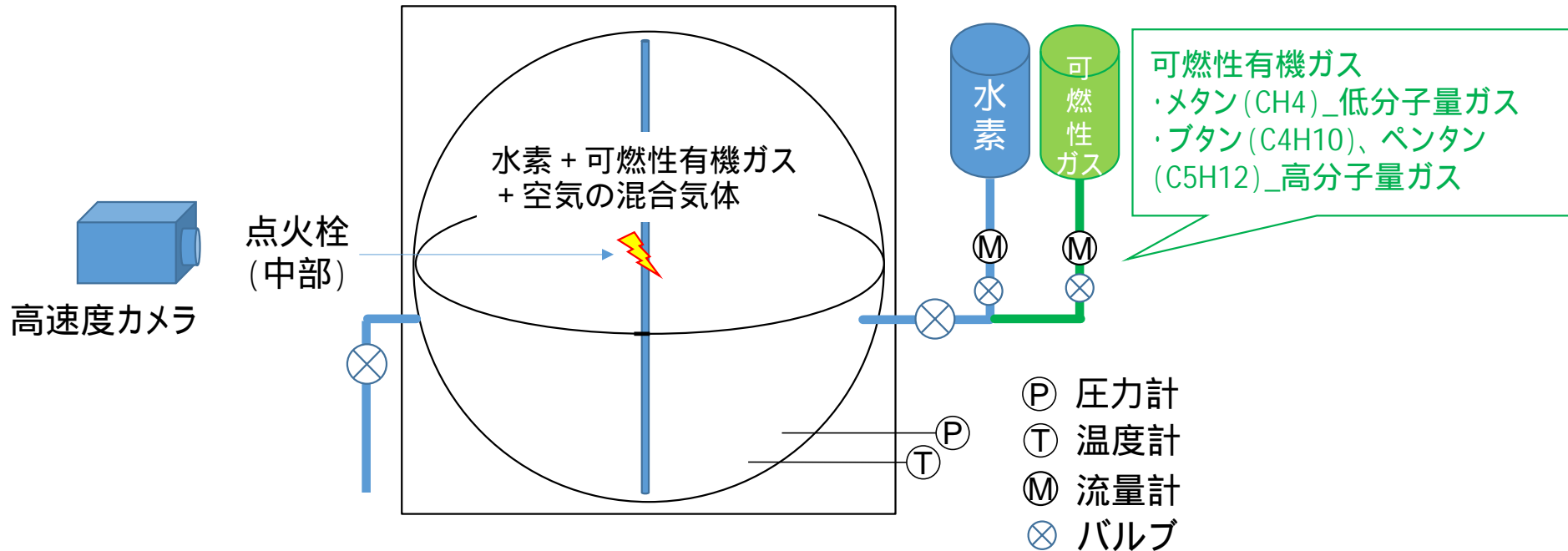
A) 水素ガスの濃度及び温度

B) 燃焼時の系内の圧力変化

C) 高速度カメラによる燃焼挙動

混合気体燃焼試験の概要

混合気体燃焼試験の概念



- 水素 + 可燃性有機ガス + 空気の混合気体を想定
- 水素濃度(4vol% ~ 20vol%等)、可燃性有機ガス濃度(数vol%等)、酸素濃度(空気量)による着火時の燃焼状態(高速度カメラ)や燃焼による温度、圧力上昇を確認

混合気体(水素、可燃性有機ガス及び空気)燃焼試験 の試験条件の例

試験資機材

水素燃焼装置

高速度カメラ

流量計、温度計、圧力計

水素ガス等(水素ガス、メタンガス、ブタンガス、空気)

パラメータ

- A) 水素濃度_4 vol%、8 vol%、10 vol%、20 vol% 【4パラメータ】
- B) 可燃性有機ガス種類_メタン(CH₄)、ブタン(C₄H₁₀) 【2パラメータ】
- C) 可燃性有機ガス濃度_1 vol%、5 vol% 【2パラメータ】

測定項目

- A) 水素ガス及び可燃性有機ガスの濃度及び温度
- B) 燃焼時の系内の圧力変化
- C) 高速度カメラによる燃焼挙動

ケーブル等加熱試験(2021年度)結果の概要

3号機の水素爆発時の映像では、火炎及び噴煙の状態から水素以外に可燃性ガスの存在が示唆された。火炎の色や輝度、燃焼時間等から可燃性の有機化合物が相当量存在していたと考えられる。また、爆発直後の衛星写真ではシールドプラグ部分から激しく水蒸気が噴出しており原子炉建屋内部にも相当量の水蒸気が存在したと考えられる。

2021年度は、BWRの格納容器内に可燃性有機化合物を含むガスの発生源となり得るケーブルや保温材が存在することから、東京電力から格納容器内で使用されているケーブル及び保温材の同材品及び類似品の試料提供を受け、これらの試料の加熱試験を東京電力及びJAEAにて行った。

その結果、各試料を約1,000℃まで加熱した際に複数の温度域で試料重量が減少すること、ケーブル等に使用されている有機材料が熱分解生成ガスとして検出されていることが確認された。

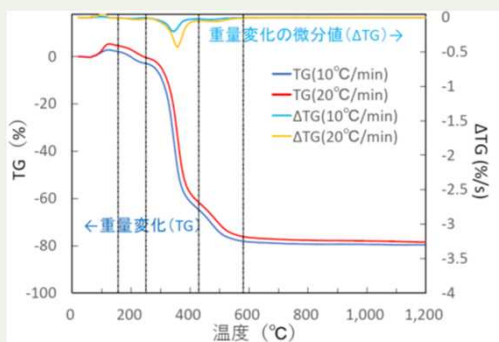
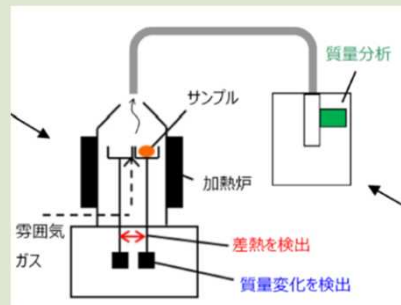
ケーブル等の加熱試験の結果概要

出典：東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会（第29回会合）資料1-1及び資料1-2

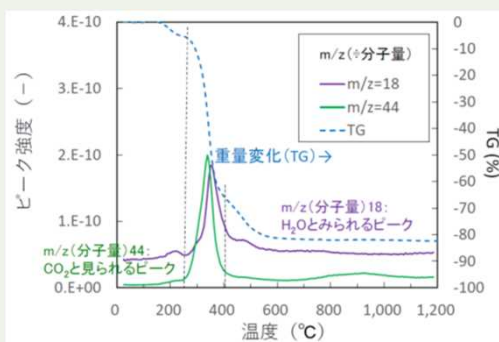
BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (予備試験)【JAEA】

熱重量測定 (TG) - 示差熱分析 (DTA) - 質量分析 (MS)

- 試料: 全4試料
- 雰囲気: 窒素
- 温度条件: 昇温速度 (10 /分、20 /分)、
最高温度1200



保温材(ウレタン)TG曲線



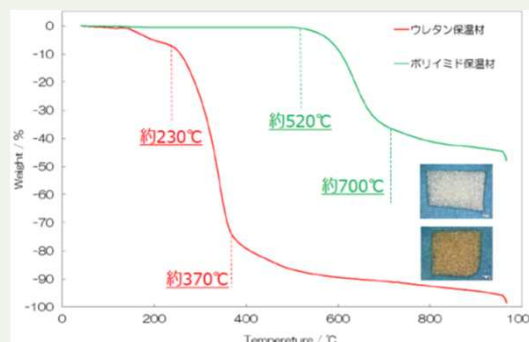
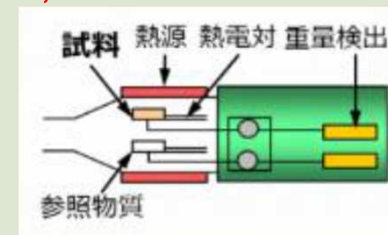
保温材(ウレタン)MS分析

- ❑ 160~250、250~420、420~580 で重量減少。
- ❑ 400 付近での重量減少では、CO₂及びH₂Oの生成が推定。

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (予備試験)【東京電力HD】

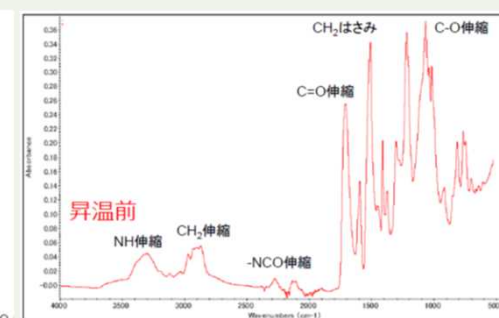
熱重量測定 (TG)、フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR)、走査型電子顕微鏡 - エネルギー分散型X線分光分析 (SEM-EDX)

- 試料: 全10試料
- 雰囲気: 窒素
- 温度条件: 昇温速度 (10 /分)、
最高温度1000

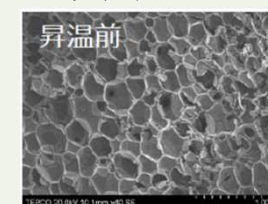


保温材TG曲線

- ❑ RT~230、230~370、370~1000 で重量減少。
- ❑ 1000 環境下で完全に揮発。



ウレタンFT-IRスペクトル



ウレタンSEM写真

昇温後試料なし

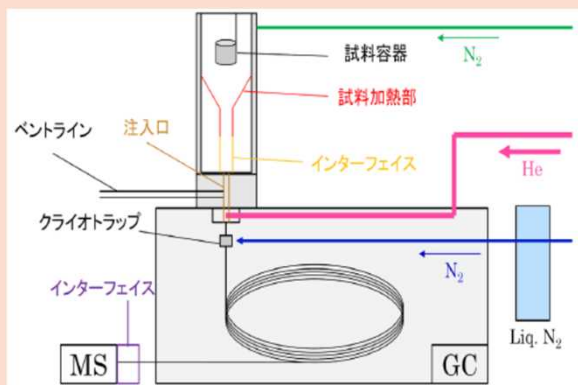
ケーブル等の加熱試験の結果概要

出典：東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会（第29回会合）資料1-1及び資料1-2

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 （本試験）【JAEA】

熱分解ガスクロマトグラフ (GC) - 質量分析 (MS)

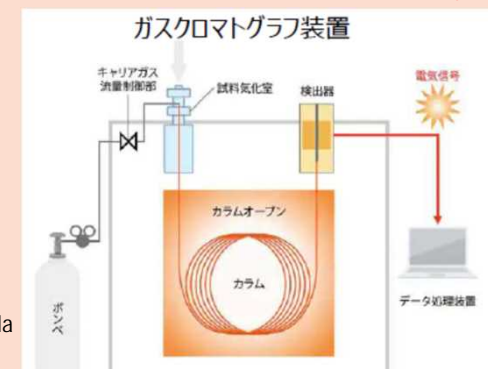
- 試料：全4試料
- 雰囲気：窒素
- 熱分解ガス採取温度：TG分析結果
- キャリアガス：He
- カラム：DB-5ms UI
（炭素数4以上の有機化合物を対象）



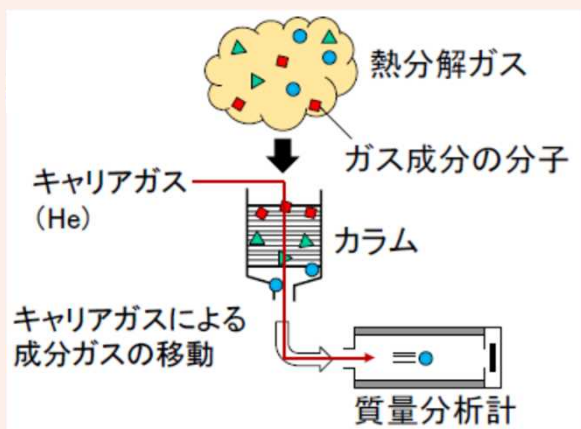
ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 （本試験）【東京電力HD】

熱分解ガスクロマトグラフ (GC) - 質量分析 (MS)、フーリエ変換赤外分光法 (FT-IR)、走査型電子顕微鏡 - エネルギー分散型X線分光分析 (SEM-EDX)

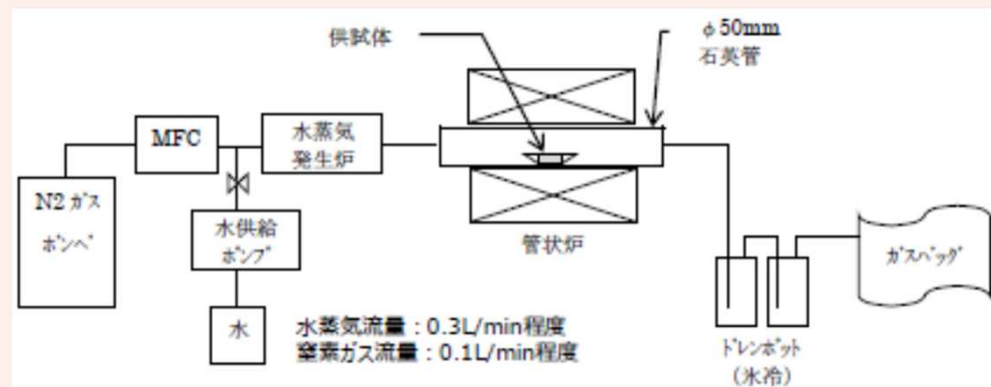
- 試料：全6試料（ケーブルはシース、絶縁体、導体含む一体もの）
- 雰囲気：水素、水蒸気
- 熱分解ガス採取温度：TG分析結果
- 200 24時間保持
- CH4等の炭素数4未満



https://www.an.shimadzu.co.jp/gc/support/faq/fundamentals/gas_chromatography.htm



GC-MS概要例



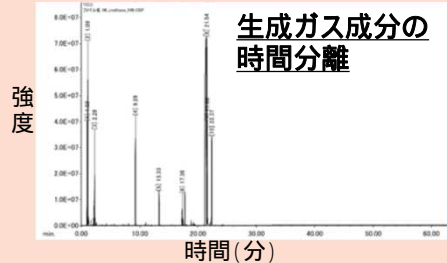
GC-MS (水蒸気環境下) 概要例

ケーブル等の加熱試験の結果概要

出典:東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第29回会合)資料1-1及び資料1-2

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (本試験)【JAEA】

熱分解ガスクロマトグラフ(GC) - 質量分析(MS) ウレタンの例



生成ガス成分を時間的に分離し、MS測定データを分析、ライブラリデータと照合し、定性分析を実施。



類似度800未満は■と記載。

ピークNo.	保持時間 (min)	ウレタンの定性結果 (246°C加熱時) ライブラリ解析		ピークNo.	保持時間 (min)	ウレタンの定性結果 (421°C加熱時) ライブラリ解析		ピークNo.	保持時間 (min)	ウレタンの定性結果 (580°C加熱時) ライブラリ解析	
		推定化合物	類似度			推定化合物	類似度			推定化合物	類似度
1	1.02	1-クロロ-3-フルオロベンゼン	608	1	1.23	アリルプロピルエーテル	697	1	1.21	シクロブチルシラン	689
2	1.09	1-クロロ-3-フルオロベンゼン	565	2	1.42	5-ヘキセン-1-オール	711	2	3.35	トルエン	919
3	2.28	1,2-ジクロロプロパン	930	3	6.68	2,3-ジメチル-3-ブテン-2-オール	713	3	9.67	ジアニリノジメチルシラン	779
4	9.28	N,N-ジメチルシクロヘキシルアミン	878	4	9.28	2-(2-クロロエトキシ)エタノール	767	4	11.54	2-メチル-3-オキサヘキサン-1,5-ジオール	742
5	13.33	3,3,3-Trifluoro-2-hydroxypropionic acid, 2-isopropyl-5-methyl-cyclohexyl ester	742	5	11.86	3-メトキシ-1,2-プロパンジオール	611	5	12.99	3,4-ジメチルアニリン	899
6	17.36	Germacrene A, 9-(methylthio)-	567	6	13.09	Pentan-2-ol, 4-allyloxy-2-methyl-	702	6	15.28	4-sec-ブチルアニリン	727
7	21.43	りん酸トリス[1-(クロロメチル)エチル]	890	7	15.79	1,1'-(1,2-プロパンジイルビスオキシ)ビス(2-プロパノール)	755	7	17.53	2,7-ジメチルキノリン	803
8	21.54	りん酸ビス[1-(クロロメチル)エチル][1-(クロロメチル)エチル]	901	8	19.08	トリイソプロピレングリコールメチルエーテル	738	8	21.13	4-ベンジルアニリン	878
9	21.6	りん酸ビス(3-クロロプロピル)[1-(クロロメチル)エチル]	916	9	22.4	2-((2-Methoxyethoxy)ethoxy) carbonyl) benzoic acid	628	9	24.12	4,4'-メチレンジアニリン	882
10	22.37	2-((2-Chloroethoxy)carbonyl) benzoic acid	678	10	33.44	4,4'-ジイソシアナ酸メチレンジフェニル	735	10	25.04	4,4'-メチレンジアニリン	879

□ 材料由来成分(ウレタンの場合はジクロロプロパン、トルエン等)となる高分子量の有機化合物を推定(炭素数4以上を検出)

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (本試験)【東京電力HD】

熱分解ガスクロマトグラフ(GC) - 質量分析(MS) ウレタンの例 ウレタン保温材昇温前後の状態



試験前

試験後
(1000 水素ガス環境下)

試験後
(1000 水蒸気環境下)

試料	ウレタン保温材ガス発生量(m3/t)						
	環境	水素ガス			水蒸気		
温度(°C)	RT~230	230~370	370~1000	RT~230	230~370	370~1000	200
H2	-	-	-	-	-	2.64E+02	-
CO	-	-	-	-	-	1.16E+02	-
CH4	5.83E-04	1.25E-03	7.35E+00	6.29E-03	1.09E-03	2.72E+01	5.49E-03
C2H4	-	4.17E-04	5.43E-01	3.59E-03	7.03E-04	6.68E+00	-
C2H6	-	5.00E-04	6.83E-01	8.98E-04	1.56E-04	1.25E+00	-
炭化 C3H6	-	1.92E-02	5.95E-01	2.70E-03	5.47E-04	3.63E+00	-
水素 C3H8	2.92E-04	5.00E-04	1.51E-01	1.80E-03	3.13E-04	4.30E-01	1.37E-03
i-C4H10	-	-	-	-	-	-	-
n-C4H10	-	-	-	-	7.81E-05	6.00E-02	-
i-C5H12	-	1.17E-03	1.23E-02	-	-	-	-
n-C5H12	-	3.08E-03	2.28E-02	-	-	1.36E-02	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)	1.52E-01	2.17E-01	3.15E-01	5.03E-01	2.27E-01	2.15E+00	8.37E-01
CH4換算合計値	1.55E-01	2.92E-01	1.24E+01	5.30E-01	2.34E-01	5.66E+01	8.51E-01
NH3	-	-	6.48E-01	-	-	3.96E-03	-
H2S	8.75E-05	7.50E-05	-	7.28E-03	9.38E-04	4.30E-02	4.67E-03

□ 水蒸気環境下の方が水素環境下よりも可燃性ガスが多く発生する傾向。

2021年度の試験結果の整理

JAEA及び東京電力の2021年度の試験結果等については、

- JAEAは、**試料単体**(絶縁体等の素材単位)を**窒素環境下**で加熱しており、単純な系で発生するガスを質量分析にかけ、定性分析を主体に実施した。その結果、**H₂O及びCO₂**を検出するとともに、**炭素数4以上の高分子量のガスを推定**した。
- 一方、**東京電力**は、**試料全体**(ケーブルの場合、シース、絶縁体、導体を含む一体としたもの)を**水素環境下及び水蒸気環境下**で加熱し、試料の加熱前後でのフーリエ変換赤外分光法や走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分光分析による状態変化を確認するとともに、**CH₄の炭素数3以下の低分子量のガスを定量**している。
- 全体としては、H₂O及びCO₂の発生量が多く、次いでCH₄等の炭素数3以下の低分子量のガス、最後に炭素数4以上の高分子量のガス(プロパンやトルエン等)が検出される傾向。高分子量のガスは、各試料の材料由来成分と考えられる。

JAEA BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (ケーブル及び保温材の加熱試験) 試料

No.	種類	仕様等	用途	試料写真等	予備試験	本試験 (1200 昇温試験)
1	ケーブル	CVケーブル シース:難燃性特殊耐熱ビニル	高圧動力用ケーブルに使用		熱重量測定 (TG)-DTA-MS	2021年度完了
2	ケーブル	PNケーブル 絶縁体:難燃性エチレンプロピレンゴム	・制御・計装ケーブルに使用 ・RPV下部に設置		熱重量測定 (TG)-DTA-MS	2021年度完了
3	ケーブル	PNケーブル シース:特殊クロロpreneゴム	・制御・計装ケーブルに使用 ・RPV下部に設置		熱重量測定 (TG)-DTA-MS	2021年度完了
4	保温材	ウレタン保温材	・配管保温		熱重量測定 (TG)-DTA-MS	2021年度完了

4 試料

出典:東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第29回会合)資料1-1

東京電力 可燃性有機ガス発生量評価（ケーブル、保温材及び塗料の昇温試験）試料

出典：東京電力福島第一原子力発電所の事故に係る検討会（第29回会合）資料1-2

No.	種類	仕様等	用途	試料写真等	予備試験	本試験 (1000 昇温試験) (200 24h試験)
1	ケーブル	CVケーブル 絶縁体：架橋ポリエチレン シース：難燃性特殊耐熱ビニル	・高圧動力用 ケーブルに使用		熱重量測定(TG) FT-IR,SEM-EDX	2021年度完了
2	ケーブル	PNケーブル 絶縁体：難燃性エチレンプロピレンゴム シース：特殊クロロプレンゴム	・制御・計装ケー ブルに使用 ・RPV下部に設置		熱重量測定(TG) FT-IR,SEM-EDX	2021年度完了
3	ケーブル	同軸ケーブル 絶縁体：ETFE / 架橋ポリエチレン シース：難燃性架橋ポリエチレン	・SRNM/LPRM ケーブルに使用 ・RPV下部に設置		熱重量測定(TG) FT-IR,SEM-EDX	2021年度完了
4	保温材	ウレタン保温材	・配管保温		熱重量測定(TG) FT-IR,SEM-EDX	2021年度完了
5	保温材	ポリイミド保温材	・配管保温		熱重量測定(TG) FT-IR,SEM-EDX	2021年度完了
6	塗料	エポキシ系塗料	・D/W、S/C壁面 上塗り		熱重量測定(TG) FT-IR,SEM-EDX	2021年度完了
7	塗料	無機ジンクリッチ塗料	・D/W、S/C壁面 下塗り		熱重量測定(TG) FT-IR,SEM-EDX	2022年度実施予定

7 試料

ケーブル等加熱試験(2021年度)結果 のデータ整理

出典:東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第30回会合)資料3 - 2
東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第29回会合)資料1 - 1及び資料1 - 2
東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第28回会合)資料3 - 1及び資料4 - 1
東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第27回会合)資料5 - 2
東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第26回会合)資料4 - 2
東京電力福島第一原子力発電所の事故の分析に係る検討会(第23回会合)資料4 - 1及び資料5 - 2
令和3年度原子力規制庁委託成果報告書(東京電力福島第一原子力発電所プラント内核種移行に関する調査)
令和4年3月 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

ケーブル等加熱試験の試料等（2021年度実施）

:分析実施 -:分析対象外
×:分析未実施

No.	種類	試料	仕様等	BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 [JAEA]	ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 [東京電力HD]	
	ケーブル	再循環ポンプ動力ケーブル	CVケーブル	-	}	
			絶縁体:架橋ポリエチレン	×		-
			シース:難燃性特殊耐熱ビニル			-
	ケーブル	原子炉圧力容器底部温度計ケーブル	PNケーブル	-	}	
			絶縁体:難燃性エチレンプロピレンゴム			-
			シース:特殊クロロプレンゴム			-
	ケーブル	SRNM/LPRMケーブル	同軸ケーブル	-	}	
			絶縁体:ETFE / 架橋ポリエチレン	×		-
			シース:難燃性架橋ポリエチレン	×		-
	保温材	原子炉補機冷却水系配管	ウレタン保温材			
	保温材	配管保温材	ポリイミド保温材	×		
	塗料	格納容器内(D/W、S/C)壁面上塗り	エポキシ系塗料	×		
	塗料	格納容器内(D/W、S/C)壁面下塗り	無機ジンクリッチ塗料	×	×	

ケーブル全体を加熱 20



ケーブル等加熱試験の試験条件等 (2021年度実施)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (予備試験)【JAEA】

TG-MS分析条件

パン(試料容器)	白金(開放式)
試料量	約 2.5 mg
測定範囲	室温 ~ 1200
昇温速度	10 / minまたは20 / min
雰囲気	窒素ガス(流量200 mL / min)
イオン化法	電子イオン化(EI)
m/zの走査範囲	2 ~ 200

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (予備試験)【東京電力HD】

予備試験：昇温中の重量変化測定(TG)によるガス採取温度域の決定
試料の昇温前後のFT-IR及びSEM-EDXを測定

TG(熱重量)測定

：試料の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料の質量を温度の関数として測定する方法。試料の熱分解や脱水等の減少など、劣化事象を定量的に測定。

FT-IR(フーリエ変換赤外分光法)

：試料に赤外光を照射し、透過または反射した光量を測定する方法。分子の構造や官能基の情報を得て、物質の定性や同定に関する情報を得ることができる。

SEM-EDX(走査型電子顕微鏡-エネルギー分散型X線分光分析)

：試料に電子線を照射し、表面にXY方向に二次元走査し、そこから発生する様々な信号を用いて表面構造の観察や組成の分析などを行う。



BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (本試験) [JAEA]

熱分解GC-MS分析条件

加熱雰囲気	N ₂ 雰囲気
試料量	2.1 mg
試料加熱温度	<ul style="list-style-type: none"> ・321 → 395 → 500 (難燃性エチレンプロピレンゴム) ・307 → 404 → 527 (特殊クロロpreneゴム) ・376 → 560 → 800 (難燃性特殊耐熱ビニル) ・246 → 421 → 580 (ウレタン)
各温度での保持時間	1分間
インターフェイス温度	240
クライオトラップ	使用する
カラム	DB-5MS UI (30 m × 0.25 mm, 0.25 μm)
キャリアーガス、流量	He, 1.0 mL/min (初期カラム流量)
スプリット比	200:1
注入口温度	240
検出器	MS, スキャンモード, m/z= 29~1000
インターフェイス温度	320
オープンの温度	40 (5 min) → 10 /min で昇温 → 320 (30 min)

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (本試験) [東京電力HD]

本試験条件設定

- 水蒸気、水素ガス環境下における1000 までの連続昇温試験 (昇温速度10 /min) 予備試験 (TG測定) で得られた結果から、ガス発生タイミングにて3つのガスサンプリング領域を設定
- 水蒸気か水素ガス環境下のいずれかにおいて、200 24時間保持試験
- ケーブルはシース、絶縁体、導体含む一体もので試験実施

本試験分析方法

- 200 、ガス発生温度域、1000 で採取したガスをガスクロマトグラフィーより分析
- 昇温前後でのケーブル等の高分子成分の変化をFT-IR より測定
- 昇温前後でのケーブル等中に含まれる各元素の相対変化をSEM-EDX より測定
- 水素ガス環境下 (水素ガス流量: 0.3L/min程度)、水蒸気環境下 (水蒸気流量: 0.3L/min程度、窒素ガス流量: 0.1L/min程度)

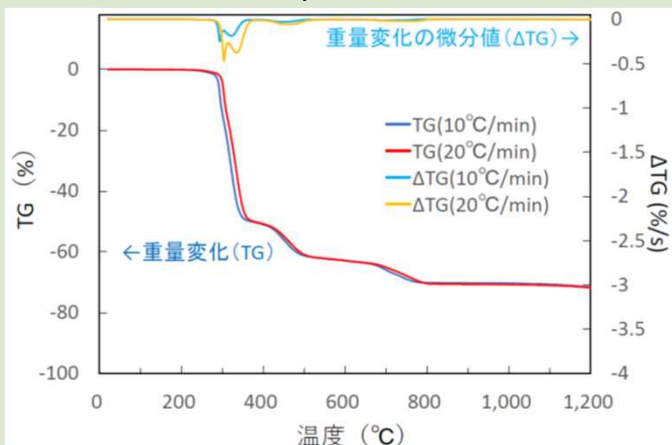
CVケーブルの結果概要 (1 / 3)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (予備試験)【JAEA】

CVケーブル シース(難燃性特殊耐熱ビニル)

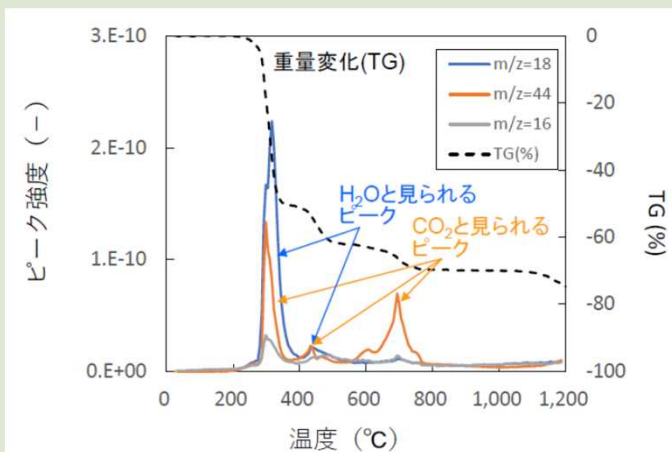


TG曲線



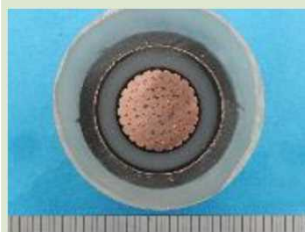
- 280~376 、
376~560 、
560~800 で
重量減少。
- 300 付近で
の重量減少で
は、CO₂及び
H₂Oの生成が
推定。

MS分析結果

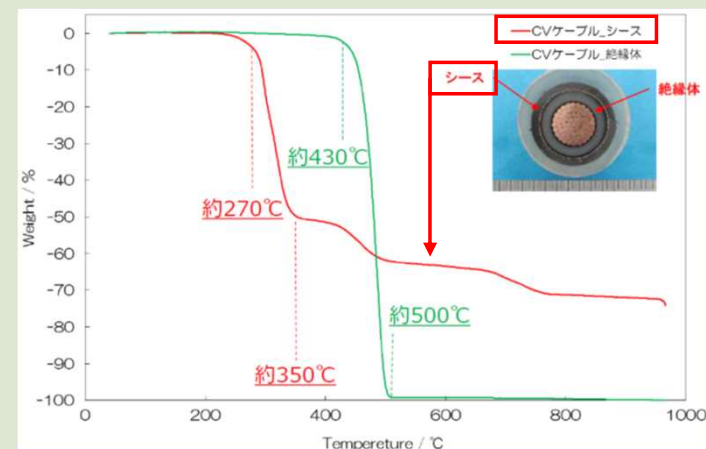


ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (予備試験)【東京電力HD】

CVケーブル シース(難燃性特殊耐熱ビニル)

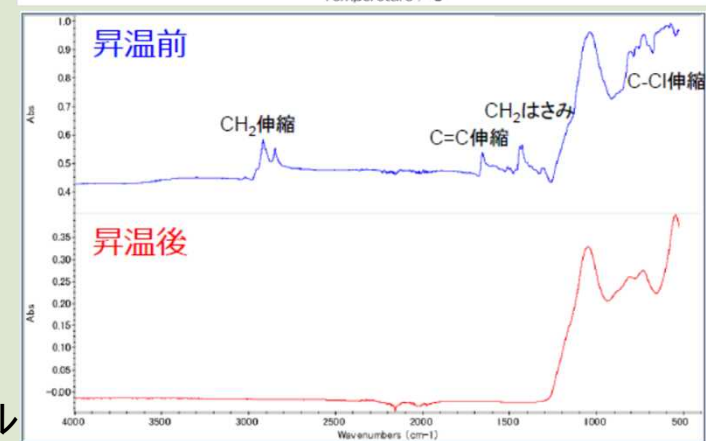


TG曲線



- 約1000 環境
下で炭化。

FT-IRスペクトル



CVケーブルの結果概要 (2 / 3)

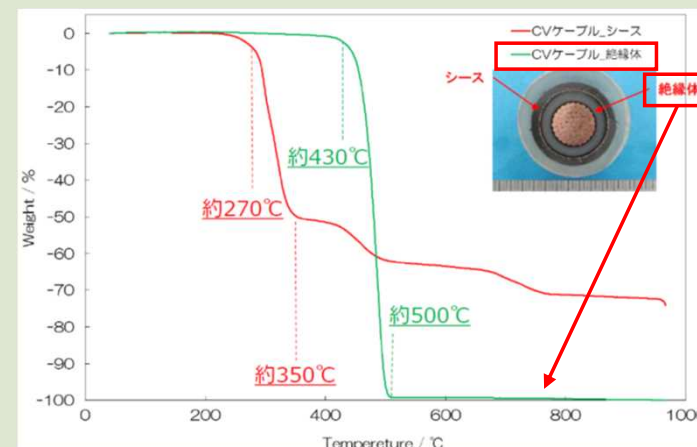
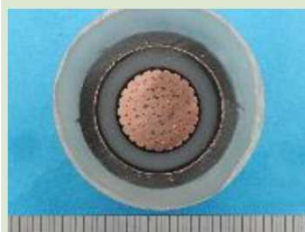
BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(予備試験)【JAEA】

CVケーブル 絶縁体(架橋ポリエチレン)

分析未実施

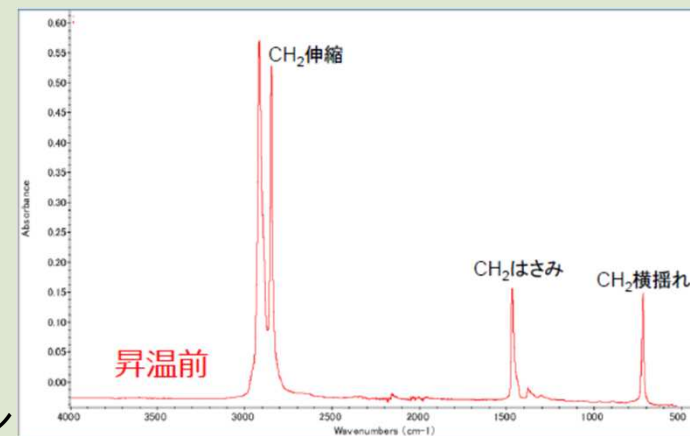
ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(予備試験)【東京電力HD】

CVケーブル 絶縁体(架橋ポリエチレン)



TG曲線

□ 約500 で揮発。

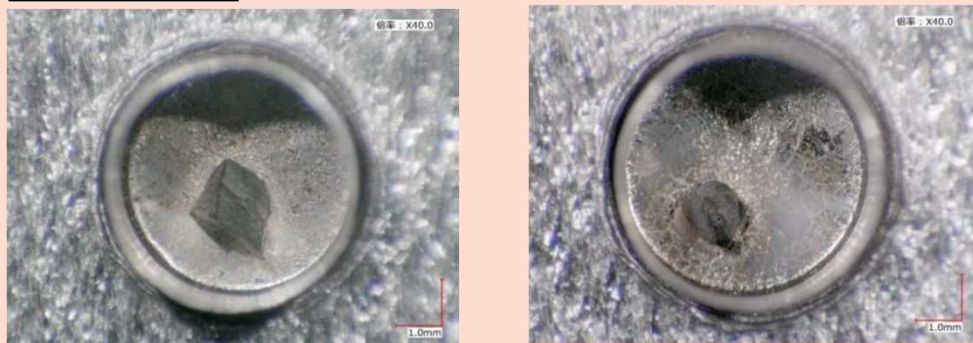


FT-IRスペクトル

CVケーブルの結果概要 (3 / 3)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (本試験)【JAEA】

CVケーブル シース(難燃性特殊耐熱ビニル)
昇温前後の状態



試験前

試験後

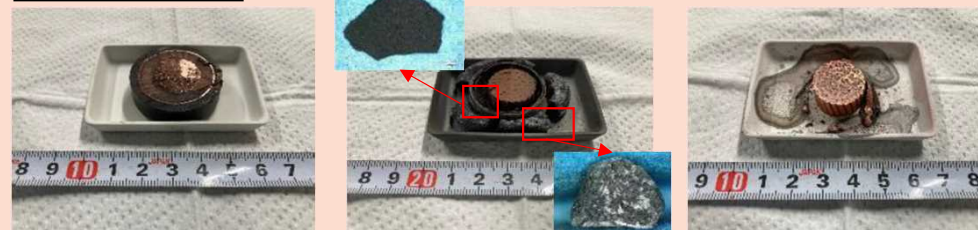
温度()	280 ~ 376	376 ~ 560	560 ~ 800	800 ~ 1200
推定発生ガス	水 二酸化炭素 2-オクテン	水 二酸化炭素 ベンゼン トルエン	水素 水 二酸化炭素	二酸化炭素

昇温条件 10 /min

- 熱分解ガスには高分子量の有機化合物が含まれると推定。
- TG-MS分析結果と合わせると、幅広い分子量の有機化合物が生成され得るが、無機ガス成分(H₂O等)に比べると、個々の生成量は低いと考えられる。

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (本試験)【東京電力HD】

CVケーブル
昇温前後の状態



試験前

試験後 シース
(1000 水素ガス環境下)

試験後
(1000 水蒸気環境下)

1000 昇温時、200 24時間保持に発生したガス分析結果

試料 環境 温度(°C)	CVケーブルガス発生量(m ³ /t)						
	水素ガス			水蒸気			水蒸気
	RT~350	350~500	500~1000	RT~350	350~500	500~1000	200
H ₂	-	-	-	-	-	1.01E+02	-
CO	-	-	2.74E+00	-	-	1.95E+01	-
CH ₄	1.52E-04	1.90E-01	1.10E+01	2.29E-04	6.53E-03	1.81E+01	2.98E-04
C ₂ H ₄	1.52E-04	1.42E-01	1.92E+00	-	4.57E-03	1.17E+01	9.92E-05
C ₂ H ₆	-	1.33E-01	1.92E+00	-	3.59E-03	2.01E+00	-
炭化水素 C ₃ H ₆	-	1.23E-01	6.17E-01	-	1.96E-03	2.41E+00	-
C ₃ H ₈	2.27E-04	8.06E-02	1.92E-01	-	1.63E-03	4.58E-01	6.95E-04
水素 i-C ₄ H ₁₀	-	1.33E-03	5.48E-03	-	1.41E-04	7.45E-03	-
n-C ₄ H ₁₀	-	5.12E-02	9.46E-02	-	5.22E-04	2.87E-01	-
i-C ₅ H ₁₂	-	1.80E-02	8.78E-02	-	-	2.64E-01	-
n-C ₅ H ₁₂	-	1.71E-02	8.36E-02	-	-	1.98E-01	-
上記以外のC ₁ ~C ₅ (CH ₄ 換算値)	-	2.65E-01	1.06E+00	-	4.03E-03	4.58E+00	-
CH ₄ 換算合計値	1.25E-03	1.90E+00	2.33E+01	5.33E-04	3.92E-02	6.02E+01	2.58E-03
NH ₃	-	-	-	3.81E-05	-	-	4.96E-05
H ₂ S	8.34E-05	2.09E-03	3.70E-03	7.46E-04	4.46E-05	2.87E-04	3.37E-04

- 水蒸気環境下でH₂及び炭化水素(CH₄換算)の発生量大。

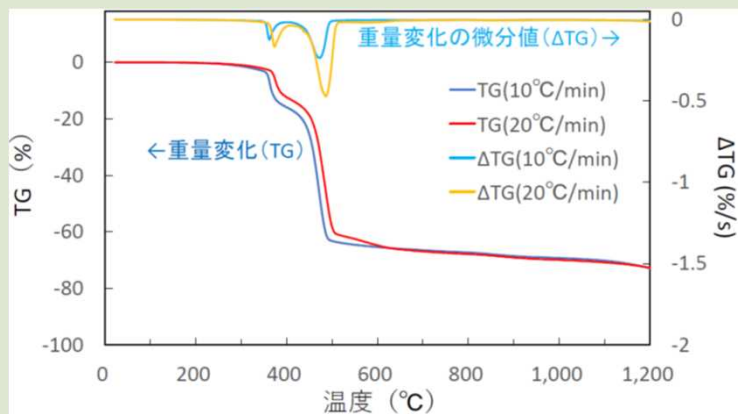
PNケーブルの結果概要 (1 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (予備試験)【JAEA】

PNケーブル 絶縁体(難燃性エチレンプロピレンゴム)

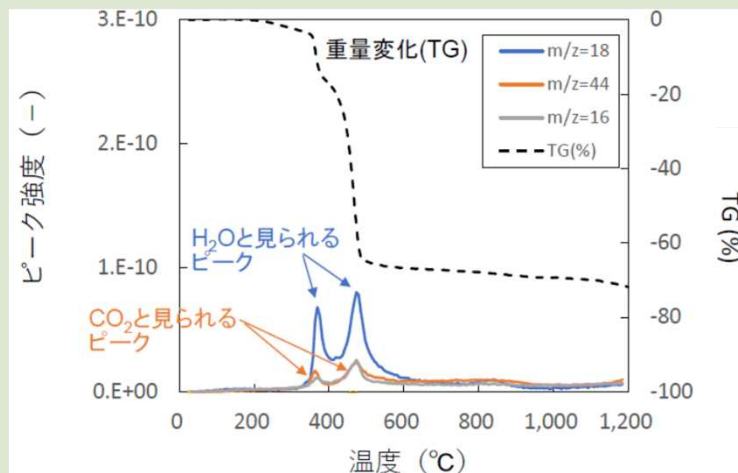


TG曲線



- 210~321、321~395、395~500 で重量減少。
- 350 付近及び450 付近での重量減少では、H₂Oの生成が推定。

MS分析結果



ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (予備試験)【東京電力HD】

PNケーブル 絶縁体(難燃性エチレンプロピレンゴム)

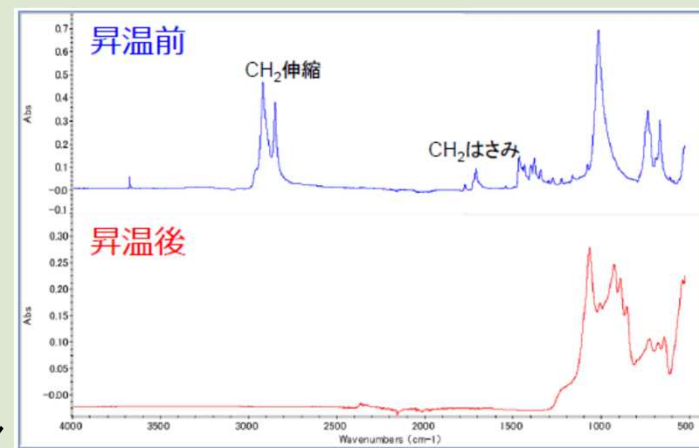


TG曲線



- 1000 環境下で完全に炭化。

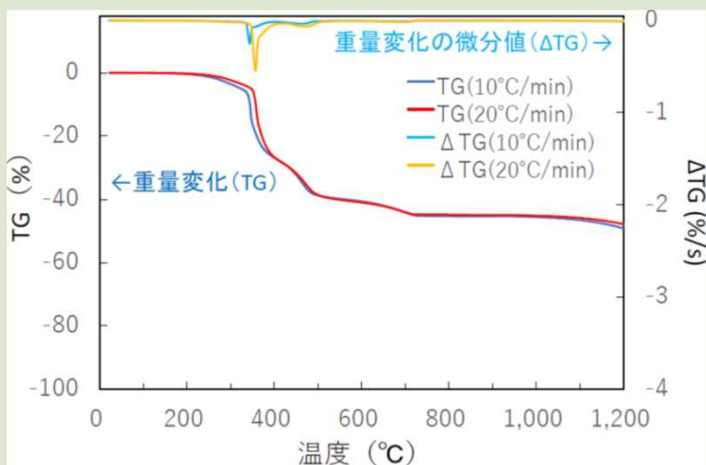
FT-IRスペクトル



PNケーブルの結果概要 (2 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (予備試験)【JAEA】

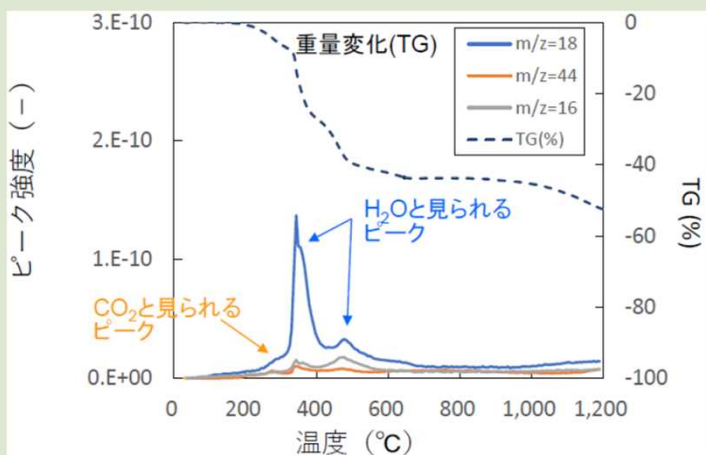
PNケーブル シース(特殊クロロpreneゴム)



TG曲線

- 230~307 、
307~404 、
404~527 、
527 ~ 700 で
重量減少。
- 350 付近で
の重量減少では、
H₂Oの生成が推定。

MS分析結果



ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (予備試験)【東京電力HD】

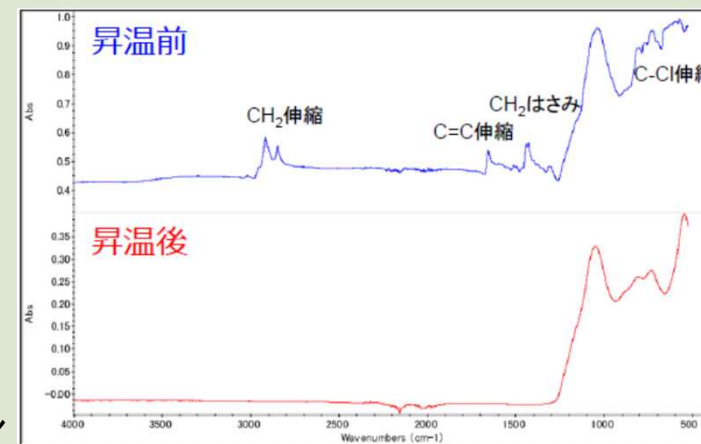
PNケーブル シース(特殊クロロpreneゴム)



TG曲線

- 1000 環境下
で完全に炭化。

FT-IRスペクトル



PNケーブルの結果概要 (3 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (本試験)【JAEA】

PNケーブル 絶縁体(難燃性エチレンプロピレンゴム)
昇温前後の状態



試験前



試験後

温度()	210 ~ 321	321 ~ 395	395 ~ 500	500 ~ 1200
推定発生ガス	二酸化炭素	水 二酸化炭素 1-ブテン	水素 水 一酸化窒素 二酸化炭素 C7炭化水素 ベンゼン トルエン	二酸化炭素

昇温条件 10 /min

❑ 熱分解ガスには高分子量の有機化合物が含まれると推定。

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (本試験)【東京電力HD】

PNケーブル
昇温前後の状態



試験前



試験後

(1000 水素ガス環境下)



試験後

(1000 水蒸気環境下)

1000 昇温時、200 24時間保持に発生したガス分析結果

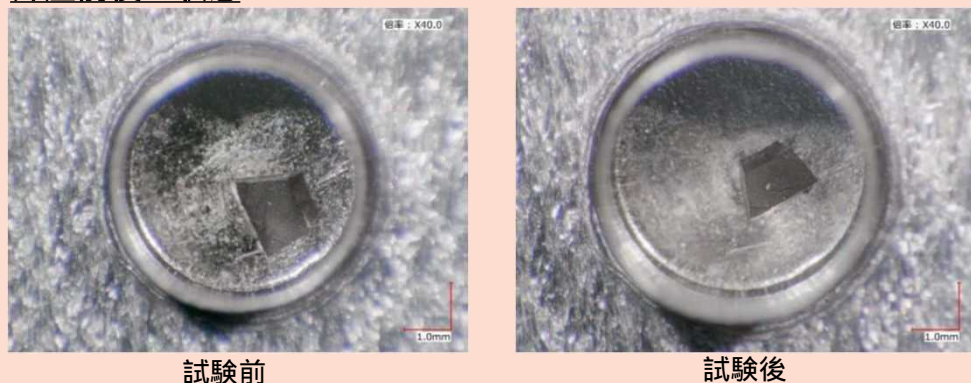
試料 環境 温度(°C)	PNケーブルガス発生量(m3/t)						
	水素ガス			水蒸気			水蒸気
	RT~400	400~500	500~1000	RT~400	400~500	500~1000	200
H2	-	-	-	-	1.55E-01	3.98E+02	-
CO	-	4.09E-02	4.32E-01	-	6.87E-02	1.62E+02	-
CH4	4.71E-02	3.80E-01	4.75E+00	3.86E-03	1.22E-01	1.83E+01	3.72E-03
C2H4	9.11E-02	2.21E-01	4.15E-01	4.87E-03	1.41E-01	6.26E+00	5.32E-04
C2H6	1.40E-02	2.09E-01	3.89E-01	7.16E-04	5.15E-02	3.05E+00	-
炭化 C3H6	5.16E-03	1.02E-01	1.99E-01	2.86E-04	1.89E-02	2.70E+00	-
水素 C3H8	7.44E-03	8.18E-02	9.08E-02	2.86E-04	1.63E-02	9.57E-01	1.33E-03
i-C4H10	-	3.60E-03	3.46E-03	-	6.18E-04	4.79E-02	-
n-C4H10	5.77E-03	4.91E-02	4.32E-02	-	7.90E-03	5.39E-01	-
i-C5H12	-	1.06E-02	1.90E-02	-	6.01E-04	2.18E-01	-
n-C5H12	4.86E-03	2.29E-02	4.32E-02	-	9.62E-04	4.26E-01	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)	7.75E-02	3.35E-01	3.89E-01	2.29E-03	9.10E-02	6.35E+00	-
CH4換算合計値	3.95E-01	2.41E+00	7.78E+00	1.86E-02	7.04E-01	5.74E+01	8.91E-03
NH3	-	-	-	-	-	-	-
H2S	1.20E-01	1.47E-01	1.04E-01	6.15E-03	5.84E-02	3.31E-01	4.65E-04

❑ 水蒸気環境下でH2及びCOの発生量大。

PNケーブルの結果概要 (4 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (本試験)【JAEA】

PNケーブル シース(特殊クロロプレンゴム) 昇温前後の状態



温度 ()	230 ~ 307	307 ~ 404	404 ~ 527	527 ~ 700	700 ~ 1200
推定 発生 ガス	水 二酸化炭素	水 二酸化炭素 2-クロロ-2-メチルプロパン 塩素 ベンゼン トルエン	水素 水 二酸化炭素 2-クロロ-2-メチルプロパン 塩素 C7炭化水素 ベンゼン トルエン	水素 水 二酸化炭素	二酸化炭素

昇温条件 10 /min

❑ 熱分解ガスには高分子量の有機化合物が含まれると推定。

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (本試験)【東京電力HD】

PNケーブル 昇温前後の状態



1000 昇温時、200 24時間保持に発生したガス分析結果

試料 環境 温度(°C)	PNケーブルガス発生量(m3/t)						
	水素ガス			水蒸気			水蒸気
	RT~400	400~500	500~1000	RT~400	400~500	500~1000	200
H2	-	-	-	-	1.55E-01	3.98E+02	-
CO	-	4.09E-02	4.32E-01	-	6.87E-02	1.62E+02	-
CH4	4.71E-02	3.80E-01	4.75E+00	3.86E-03	1.22E-01	1.83E+01	3.72E-03
C2H4	9.11E-02	2.21E-01	4.15E-01	4.87E-03	1.41E-01	6.26E+00	5.32E-04
C2H6	1.40E-02	2.09E-01	3.89E-01	7.16E-04	5.15E-02	3.05E+00	-
炭化水素 C3H6	5.16E-03	1.02E-01	1.99E-01	2.86E-04	1.89E-02	2.70E+00	-
C3H8	7.44E-03	8.18E-02	9.08E-02	2.86E-04	1.63E-02	9.57E-01	1.33E-03
水素 i-C4H10	-	3.60E-03	3.46E-03	-	6.18E-04	4.79E-02	-
n-C4H10	5.77E-03	4.91E-02	4.32E-02	-	7.90E-03	5.39E-01	-
i-C5H12	-	1.06E-02	1.90E-02	-	6.01E-04	2.18E-01	-
n-C5H12	4.86E-03	2.29E-02	4.32E-02	-	9.62E-04	4.26E-01	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)	7.75E-02	3.35E-01	3.89E-01	2.29E-03	9.10E-02	6.35E+00	-
CH4換算合計値	3.95E-01	2.41E+00	7.78E+00	1.86E-02	7.04E-01	5.74E+01	8.91E-03
NH3	-	-	-	-	-	-	-
H2S	1.20E-01	1.47E-01	1.04E-01	6.15E-03	5.84E-02	3.31E-01	4.65E-04

❑ 水蒸気環境下でH2及びCOの発生量大。

同軸ケーブルの結果概要(1 / 4)

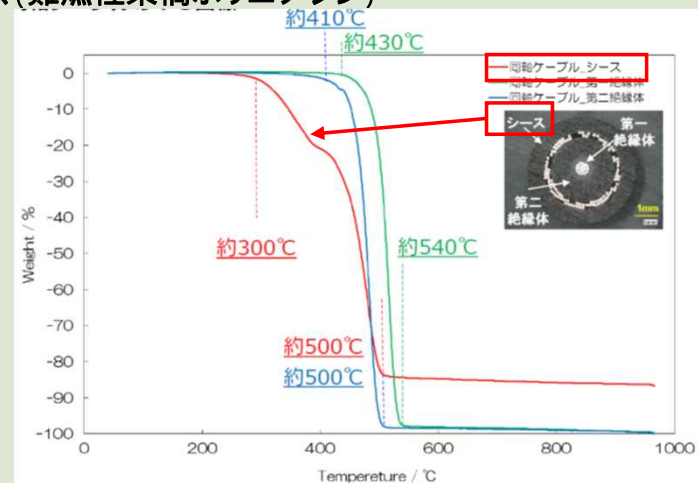
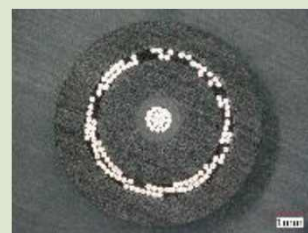
BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(予備試験)【JAEA】

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(予備試験)【東京電力HD】

同軸ケーブル

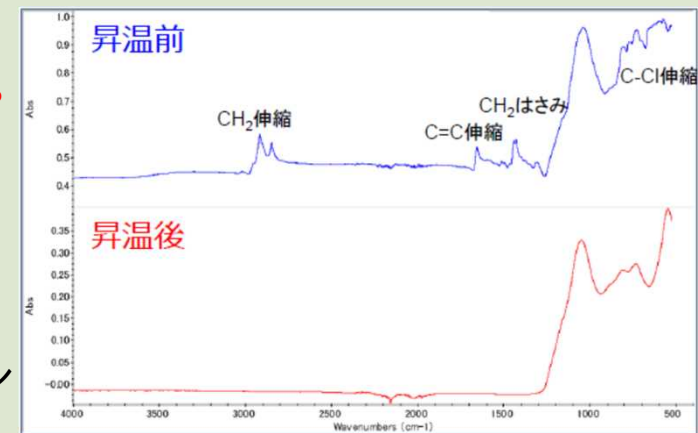
同軸ケーブル シース(難燃性架橋ポリエチレン)

分析未実施



TG曲線

□ 約1000 まで
昇温すると炭化。



FT-IRスペクトル

同軸ケーブルの結果概要 (2 / 4)

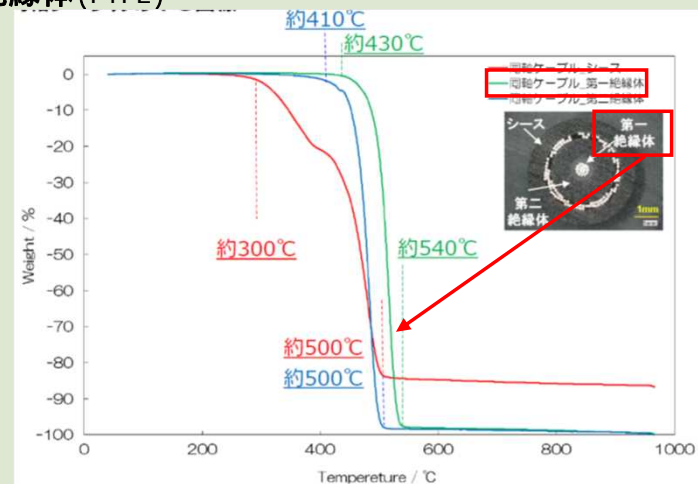
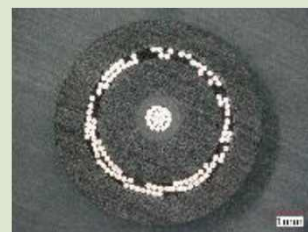
BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(予備試験)【JAEA】

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(予備試験)【東京電力HD】

同軸ケーブル

同軸ケーブル 第1絶縁体 (FTFE)

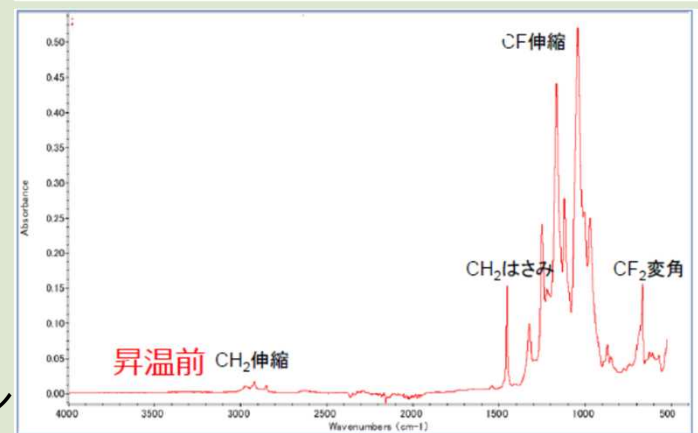
分析未実施



TG曲線

□ 約540 で揮発。

FT-IRスペクトル



同軸ケーブルの結果概要 (3 / 4)

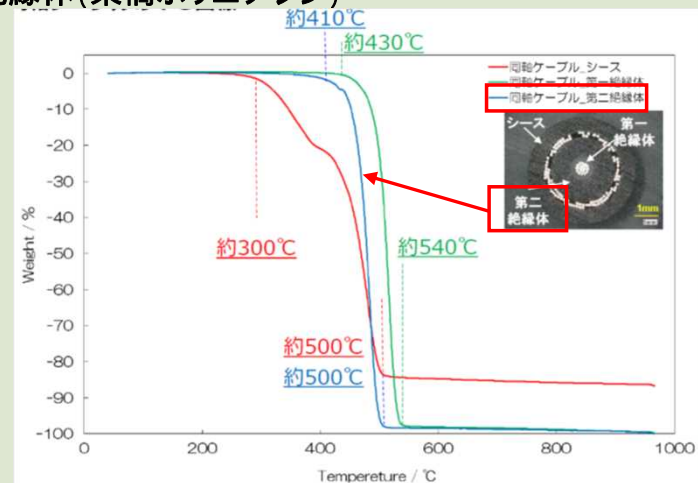
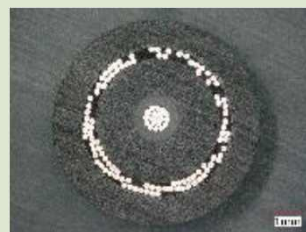
BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(予備試験)【JAEA】

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(予備試験)【東京電力HD】

同軸ケーブル

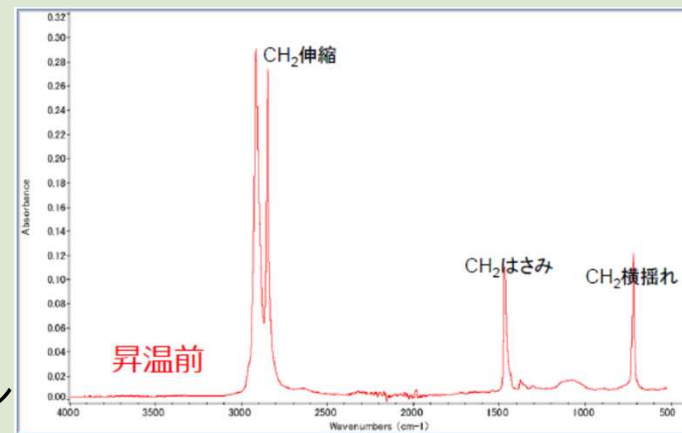
同軸ケーブル 第2絶縁体(架橋ポリエチレン)

分析未実施



TG曲線

□ 約500 で揮発。



FT-IRスペクトル

同軸ケーブルの結果概要(4 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(本試験)【JAEA】

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(本試験)【東京電力HD】

同軸ケーブル

分析未実施

同軸ケーブル
昇温前後の状態



試験前



試験後

(1000 水素ガス環境下)



試験後

(1000 水蒸気環境下)

1000 昇温時、200 24時間保持に発生したガス分析結果

試料 環境 温度(°C)	同軸ケーブルガス発生量(m3/t)						
	水素ガス			水蒸気			
	RT~400	400~540	540~1000	RT~400	400~540	540~1000	200
H2	-	-	-	-	-	3.37E+01	-
CO	-	-	-	-	-	1.17E+01	-
CH4	1.27E-03	1.52E-01	2.76E+00	2.14E-03	1.81E-02	7.12E+00	1.29E-03
C2H4	2.29E-03	1.62E-01	5.31E-01	-	2.05E-02	5.44E+00	-
C2H6	7.62E-04	1.20E-01	5.84E-01	5.35E-04	1.40E-02	1.26E+00	-
炭化 C3H6	7.62E-04	1.20E-01	1.81E-01	-	7.91E-03	1.51E+00	-
水素 n-C4H10	-	1.02E-03	5.31E-04	-	-	-	-
i-C4H10	-	2.91E-02	2.92E-02	-	1.12E-03	1.72E-01	-
i-C5H12	-	1.43E-02	1.86E-02	-	-	6.28E-02	-
n-C5H12	-	1.20E-02	2.02E-02	-	-	3.98E-02	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)	5.84E-03	2.68E-01	3.29E-01	-	1.07E-02	2.93E+00	-
CH4換算合計値	1.80E-02	1.66E+00	6.37E+00	5.88E-02	1.40E-01	2.72E+01	1.22E-02
NH3	-	-	-	-	-	-	-
H2S	-	-	2.02E-03	3.74E-04	1.49E-04	2.93E-04	1.22E-03

□ 水蒸気環境下でH2及び炭化水素(CH4換算)の発生量大。

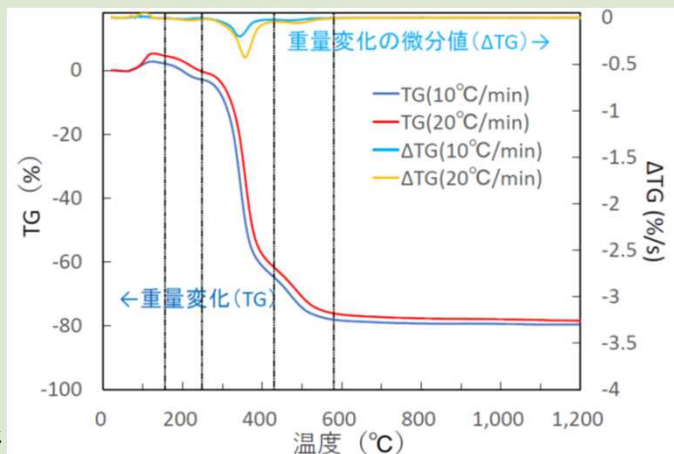
保温材の結果概要 (1 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (予備試験)【JAEA】

保温材(ウレタン)

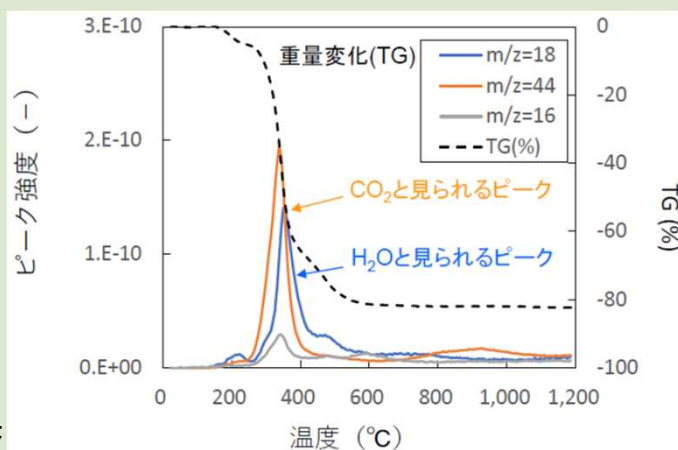


TG曲線



- 160 ~ 246 、 246 ~ 421 、 421 ~ 580 で重量減少。
- 400 付近での重量減少では、CO₂及びH₂Oの生成が推定。

MS分析結果

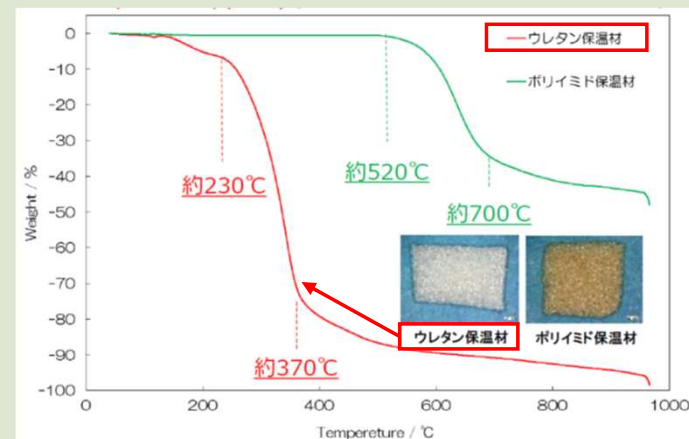


ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (予備試験)【東京電力HD】

保温材(ウレタン)

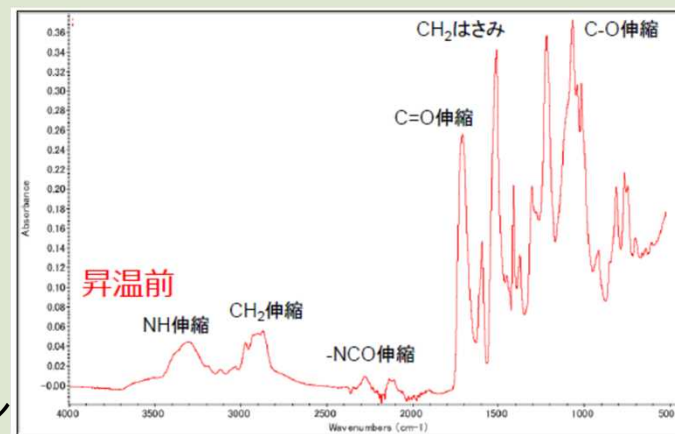


TG曲線



- RT ~ 230 、 230 ~ 370 、 370 ~ 1000 で重量減少。
- 1000 環境下で完全に揮発。

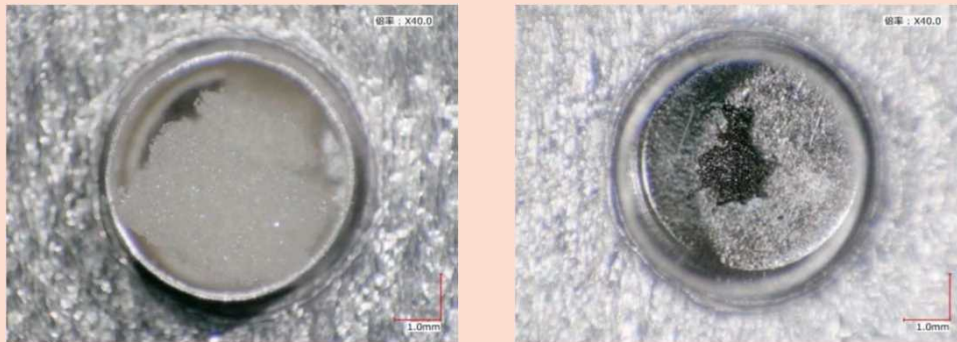
FT-IRスペクトル



保温材の結果概要 (2 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析 (本試験)【JAEA】

保温材(ウレタン)
昇温前後の状態



試験前

試験後

温度 ()	160 ~ 246	246 ~ 421	421 ~ 580	580 ~ 1200
推定発生ガス	C8炭化水素 二酸化炭素 塩化アリル	水 一酸化炭素 二酸化炭素 イソ酪酸	ベンゼン トルエン	-

昇温条件 10 /min

- 材料由来成分(ウレタンの場合はジクロロプロパン、トルエン等)となる高分子量の有機化合物を推定(炭素数4以上を検出)
- TG-MS分析結果と合わせると、幅広い分子量の有機化合物が生成され得るが、無機ガス成分(H₂O等)に比べると、個々の生成量は低いと考えられる。

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験 (本試験)【東京電力HD】

保温材(ウレタン)
昇温前後の状態



試験前

試験後

(1000 水素ガス環境下) (1000 水蒸気環境下)

1000 昇温時、200 24時間保持に発生したガス分析結果

試料	ウレタン保温材ガス発生量(m3/t)						
	水素ガス			水蒸気			
環境	RT~230	230~370	370~1000	RT~230	230~370	370~1000	200
H ₂	-	-	-	-	-	2.64E+02	-
CO	-	-	-	-	-	1.16E+02	-
CH ₄	5.83E-04	1.25E-03	7.35E+00	6.29E-03	1.09E-03	2.72E+01	5.49E-03
C ₂ H ₄	-	4.17E-04	5.43E-01	3.59E-03	7.03E-04	6.68E+00	-
C ₂ H ₆	-	5.00E-04	6.83E-01	8.98E-04	1.56E-04	1.25E+00	-
炭化水素 C ₃ H ₆	-	1.92E-02	5.95E-01	2.70E-03	5.47E-04	3.63E+00	-
水素 C ₃ H ₈	2.92E-04	5.00E-04	1.51E-01	1.80E-03	3.13E-04	4.30E-01	1.37E-03
水素 i-C ₄ H ₁₀	-	-	-	-	-	-	-
水素 n-C ₄ H ₁₀	-	-	-	-	7.81E-05	6.00E-02	-
水素 i-C ₅ H ₁₂	-	1.17E-03	1.23E-02	-	-	-	-
水素 n-C ₅ H ₁₂	-	3.08E-03	2.28E-02	-	-	1.36E-02	-
上記以外のC ₁ ~C ₅ (CH ₄ 換算値)	1.52E-01	2.17E-01	3.15E-01	5.03E-01	2.27E-01	2.15E+00	8.37E-01
CH ₄ 換算合計値	1.55E-01	2.92E-01	1.24E+01	5.30E-01	2.34E-01	5.66E+01	8.51E-01
NH ₃	-	-	6.48E-01	-	-	3.96E-03	-
H ₂ S	8.75E-05	7.50E-05	-	7.28E-03	9.38E-04	4.30E-02	4.67E-03

- 水蒸気環境下でH₂及びCOの発生量大。

保温材の結果概要 (3 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(予備試験)【JAEA】

保温材(ポリイミド)

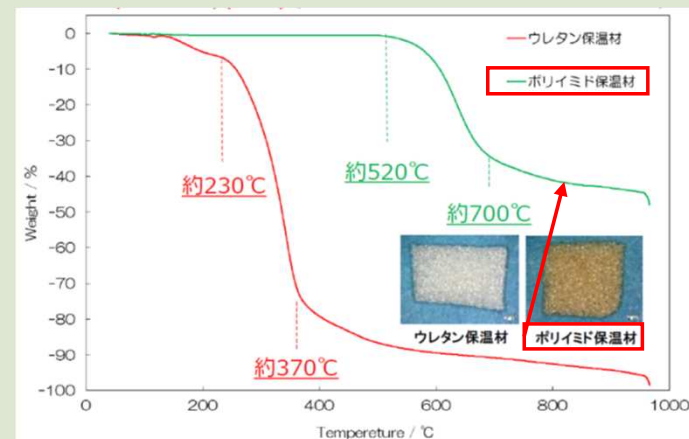
分析未実施

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(予備試験)【東京電力HD】

保温材(ポリイミド)

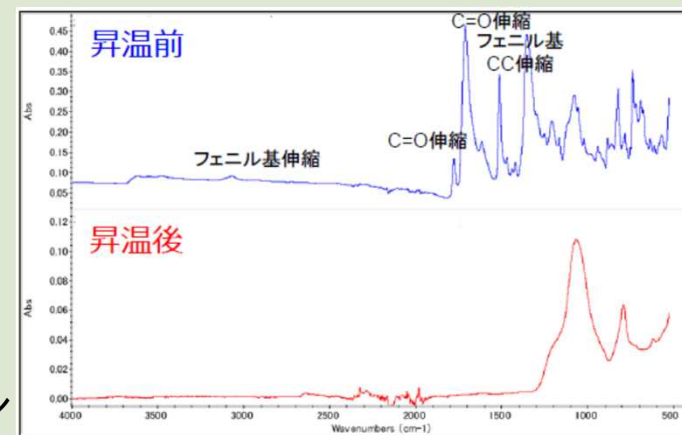


TG曲線



- ポリイミド保温材は約1000環境下で完全に炭化

FT-IRスペクトル



保温材の結果概要 (4 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(本試験)【JAEA】

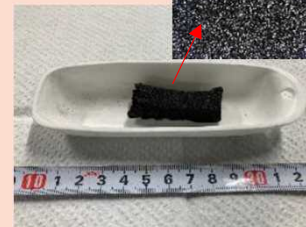
ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(本試験)【東京電力HD】

保温材(ポリイミド)

保温材(ポリイミド)
昇温前後の状態



試験前



試験後
(1000 水素ガス環境下)



試験後
(1000 水蒸気環境下)

分析未実施

1000 昇温時、200 24時間保持に発生したガス分析結果

試料 環境 温度(°C)	ポリイミド保温材ガス発生量(m3/t)						
	水素			水蒸気		水素ガス	
	RT~520	520~700	700~1000	RT~520	520~700	700~1000	
H2	-	-	-	-	-	6.32E+02	-
CO	-	7.38E+00	3.08E+00	-	1.71E+00	3.94E+02	-
CH4	1.40E-02	2.22E-01	9.85E+00	6.57E-03	5.14E-02	2.36E+01	1.52E-04
C2H4	1.08E-03	1.35E-02	5.23E-02	-	6.57E-03	1.36E+00	-
C2H6	-	9.23E-03	4.00E-02	-	2.86E-04	3.53E-02	-
炭 C3H6	-	3.08E-03	-	-	2.00E-03	7.87E-02	-
化 C3H8	1.08E-03	2.65E-02	7.38E-02	-	2.86E-04	1.60E-01	-
水 素 i-C4H10	-	-	-	-	-	-	-
n-C4H10	-	-	-	-	-	-	-
i-C5H12	-	-	-	-	-	-	-
n-C5H12	-	-	-	-	-	-	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)	4.95E-02	1.78E-02	2.46E-02	-	-	7.60E-02	-
CH4換算合計値	7.22E-02	3.69E-01	1.05E+01	1.31E-02	7.14E-02	2.69E+01	4.55E-04
NH3	5.38E-04	3.08E-02	1.60E+00	1.64E-03	-	1.36E-03	-
H2S	-	-	-	3.29E-04	5.71E-05	1.63E-03	-

□ 水蒸気環境下でH2及びCOの発生量大。

塗料の結果概要 (1 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(予備試験)【JAEA】

塗料(エポキシ系塗料)

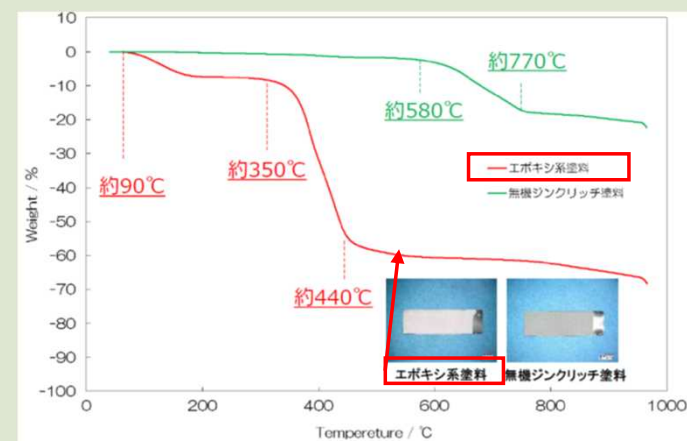
分析未実施

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(予備試験)【東京電力HD】

塗料(エポキシ系塗料)

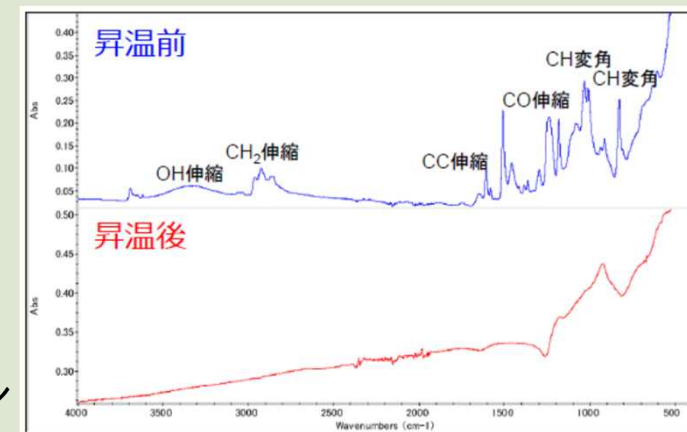


TG曲線



□ エポキシ系塗料は約1000 環境下で完全に炭化

FT-IRスペクトル



塗料の結果概要 (2 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(本試験)【JAEA】

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(本試験)【東京電力HD】

塗料(エポキシ系塗料)

塗料(エポキシ系塗料)
昇温前後の状態



試験前



試験後
(1000 水素ガス環境下)



試験後
(1000 水蒸気環境下)

分析未実施

1000 昇温時、200 24時間保持に発生したガス分析結果

試料 環境 温度(°C)	エポキシ系塗料ガス発生量(m3/t)						
	水素ガス			水蒸気			水蒸気
	RT~200	200~600	600~1000	RT~200	200~600	600~1000	200
H2	-	-	-	-	-	1.31E+02	-
CO	-	-	1.50E+00	-	-	2.05E+01	-
炭化水素							
CH4	1.97E-04	2.36E-01	3.74E+00	1.11E-02	2.39E-02	1.57E+01	8.24E-03
C2H4	-	4.13E-02	2.69E-01	8.55E-03	4.87E-03	4.44E+00	-
C2H6	-	5.51E-02	2.17E-01	2.56E-03	3.42E-03	5.40E-01	-
C3H6	-	3.94E-02	1.72E-02	6.84E-03	3.76E-03	6.22E-01	-
C3H8	1.97E-04	1.91E-02	8.23E-03	2.56E-03	1.45E-03	1.37E-01	2.06E-03
i-C4H10	-	-	-	-	4.27E-04	-	-
n-C4H10	-	5.71E-03	-	1.71E-03	3.42E-04	3.76E-02	-
i-C5H12	-	-	-	-	-	-	-
n-C5H12	-	3.54E-03	-	-	5.13E-04	1.91E-02	-
上記以外のC1~C5(CH4換算値)	2.36E-03	1.24E-01	1.65E-02	3.59E-02	9.40E-03	8.21E-01	6.18E-02
CH4換算合計値	3.15E-03	7.28E-01	4.79E+00	1.11E-01	6.92E-02	2.87E+01	8.03E-02
NH3	1.97E-04	3.94E-02	1.50E-03	-	-	-	-
H2S	-	-	8.98E-02	-	-	6.77E-01	4.12E-04

□ 水蒸気環境下でH2及び炭化水素(CH4換算)の発生量大。

塗料の結果概要 (3 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(予備試験)【JAEA】

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(予備試験)【東京電力HD】

塗料(無機ジンクリッチ塗料)

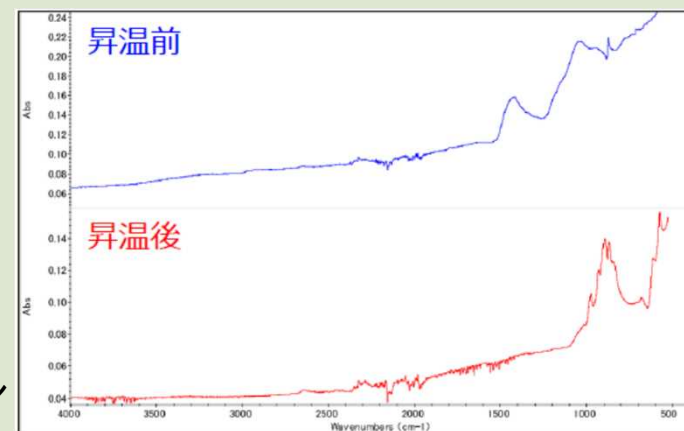
塗料(無機ジンクリッチ塗料)

分析未実施



TG曲線

- 無機ジンクリッチ塗料は主成分が有機物ではなく、可燃性ガスの発生はほとんど無いものと考えられる。



FT-IRスペクトル

塗料の結果概要 (4 / 4)

BWR格納容器内有機材料熱分解生成気体の分析
(本試験)【JAEA】

ケーブル・塗料・保温材の可燃性ガス発生量評価試験
(本試験)【東京電力HD】

塗料(無機ジンクリッチ塗料)

塗料(無機ジンクリッチ塗料)

分析未実施

分析未実施